



Akhilesh Kesavanunnithan

摘要

DRV8376 是一款集成了低侧电流检测放大器的三相电机驱动器，可以对 BLDC 电机应用进行高效的电流监控、支持过流保护、扭矩控制和换向。但是，增益误差和温度漂移会降低测量精度，从而影响电机性能。本应用手册解释了 DRV8376 的电流检测放大器架构和误差源，提出了一些实际的校准方法，包括室温、多温度、自校准和基于软件的补偿，以便在宽温度范围内验证精度。本应用手册为工程师提供了使用 DRV8376 优化电流检测的简单直接的策略。

内容

1 简介.....2

2 使用 DRV8376 进行低侧电流检测的优势和挑战.....3

    2.1 低侧电流检测的优势.....3

    2.2 低侧电流检测面临的挑战.....3

3 DRV8376 电流检测放大器 (CSA) 架构.....4

    3.1 增益误差与温度间的关系.....4

    3.2 校准方法.....5

4 总结.....6

5 参考资料.....6

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

DRV8376 提供用于驱动 4.5V 至 65V 无刷直流电机的栅极驱动和功率级。DRV8376 集成了三个 1/2H 桥，具有 70V 的绝对最大电压和  $400\text{m}\Omega$  的超低  $\text{RDS(ON)}$  (高侧 + 低侧)，可提供大功率驱动能力。使用集成电流检测功能来检测电流，无需外部检测电阻器。带有集成式 LDO 的电源管理功能为器件生成必要的电压轨，可用于为外部电路供电。DRV8376 实现了 6x 或 3x PWM 控制方案，可用于通过外部微控制器实现有传感器或无传感器磁场定向控制 (FOC)、正弦控制或梯形控制。DRV8376 能够驱动高达 100kHz 的 PWM 频率。该控制方案具有高度可配置性，可通过硬件引脚或寄存器设置进行配置，涵盖范围从电机电流限制行为到故障响应。

DRV8376 集成了三个高性能低侧电流检测放大器，以便使用内置电流检测进行电流测量。通常会通过测量低侧电流来实施过流保护、外部扭矩控制或通过外部控制器进行无刷直流换向。三个放大器都可用于检测每个半桥臂 (低侧 FET) 中的电流。电流检测放大器包括可编程增益等特性，并在电压基准引脚 (VREF) 上提供外部基准。

## 2 使用 DRV8376 进行低侧电流检测的优势和挑战

DRV8376 集成式电流检测放大器 (CSA) 中实现了低侧电流检测，这是一种用于监测无刷直流 (BLDC) 电机驱动器中相电流的广泛方法。这种配置使用基于集成传感 FET 的方法，为成本敏感型和高性能电机控制应用提供独特的优势。但是，这一应用也容易受到特定误差源（尤其是增益误差和温度漂移）的影响，必须解决这些误差源以验证精度。本节概述了使用 DRV8376 进行低侧传感的主要优势，以及需要仔细校准方法时面临的挑战。

### 2.1 低侧电流检测的优势

#### 2.1.1 低电平共模电压

在低侧检测中，检测元件两端的电压接近地电位，导致产生低共模电压（通常  $< 1V$ ）。这样就不再需要高共模抑制比 (CMRR) 放大器，而这种放大器对于共模电压可以达到电机电源电压（例如 24V 或 48V）的高侧检测至关重要。DRV837x 的内部 CSA 针对这种低共模环境进行了优化，支持使用更简单、成本更低且高精度的放大器设计，因为  $SOx$  输出 ( $V_{SOx} = I_{SENSE} \times G_{CSA} + VREF/2$ ) 是以稳定的 VREF 引脚为基准的。

#### 2.1.2 具有成本效益

低侧电流检测本质上经济实惠，因为这样就无需在高侧配置中使用高电压隔离式传感元件。DRV8376 的集成检测 FET 无需使用外部并联电阻器，进一步降低了成本。对于低温精密选件，该并联电阻器的价格范围为 0.50 美元至 2.00 美元。这种集成简化了物料清单 (BOM) 并减少了 PCB 空间，使得 DRV8376 成为消费类电器或入门级汽车系统等成本敏感型应用的极具吸引力的选择。

### 2.2 低侧电流检测面临的挑战

尽管低侧电流检测有诸多优点，但容易受到可能降低测量精度的误差源的影响，此情况在精密 BLDC 电机控制应用中尤其明显。主要挑战是增益误差和温度漂移，这直接影响器件为扭矩控制、过流保护和换向提供可靠电流测量的能力

#### 2.2.1 增益误差

增益误差是由于 DRV8376 的内部增益设置电阻器不匹配以及功率级 FET 与 senseFET 之间的不匹配引起的。例如，CSA 的增益网络中 1% 的不匹配（例如， $G_{CSA} = 0.4V/A$ ）可能会在  $SOx$  输出电压中引入相应的 1% 误差，从而影响电流测量精度。在电机驱动器中，这种误差可能导致扭矩控制不精确或换向时序不正确，从而降低效率和性能。

#### 2.2.2 温漂

温度变化会通过 CSA 内部增益网络（通常为  $20ppm/^{\circ}C$ ）和外部元件（例如 PCB 布线或分流电阻器 ( $50 - 200ppm/^{\circ}C$ )）的温度系数加剧增益误差。在 DRV8376 的  $-40^{\circ}C$  到  $+150^{\circ}C$  工作范围内，即使温度系数低，也会引起明显的漂移。例如， $100^{\circ}C$  范围内的  $20ppm/^{\circ}C$  漂移会导致 0.2% 的增益误差，这可能会导致  $SOx$  输出中出现可测量的误差，从而影响汽车或工业环境等恶劣环境中的系统可靠性。

### 3 DRV8376 电流检测放大器 (CSA) 架构

DRV8376 为电流检测放大器 (CSA) 采用了基于 senseFET 的低侧电流检测架构，具有自适应失调电压校准功能，可减少与最终级放大器的偏移误差相关的误差。下图显示了 CSA 的简化方框图。

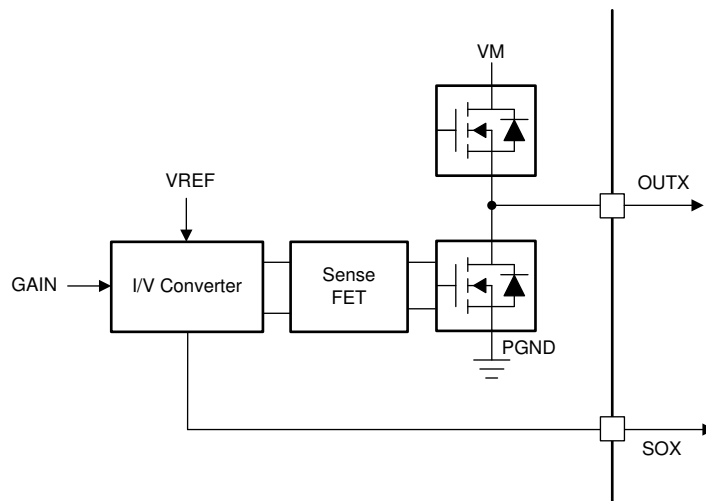


图 3-1. 电流检测放大器架构

DRV8376 上的 SOx 引脚输出的模拟电压与低侧 FET 中流动的电流和增益设置 ( $G_{CSA}$ ) 的乘积成比例。增益设置可在四个不同级别之间调节，这些级别可通过 GAIN 引脚 (在硬件器件型号中) 或 GAIN 位 (在 SPI 器件型号中) 设置。电流检测是通过 DRV8376 器件在每个低侧 FET 上的传感 FET 实现的。该电流信息反馈到内部 I/V 转换器，该转换器根据 VREF 引脚上的电压和增益设置在 SOx 引脚上生成 CSA 输出电压。CSA 输出电压可按以下公式计算：

$$SOX = \left( V_{REF} / 2 \right) \pm GAIN \times I_{OUTX} \quad (1)$$

#### 3.1 增益误差与温度间的关系

增益误差是指实际增益与标称增益值的偏差，通常会受到温度变化的影响。在 DRV8376 等三相电机驱动器中，增益通常在  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $+125^{\circ}\text{C}$  的温度范围内表现出线性相关性，从而影响电流检测放大器或 PWM 输出的精度。

图 3-2 显示了 DRV8376 在两个不同电机电压为 24V 和 48V 时的增益误差。

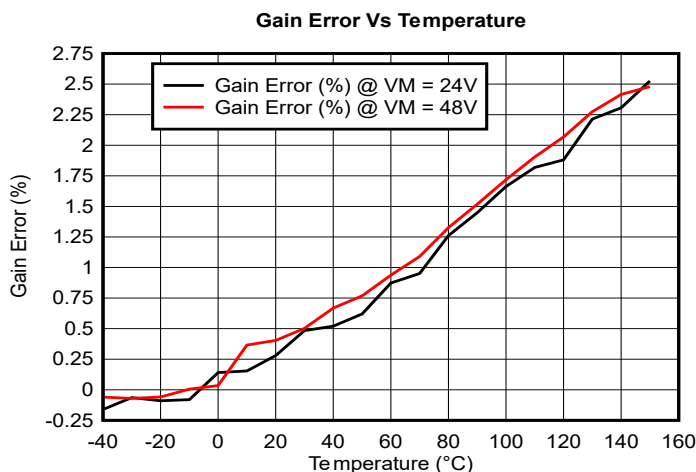


图 3-2. 未校准的增益误差

### 3.2 校准方法

以下校准方法可用于解决 DRV8376 中的增益误差。室温校准会测量 DRV8376 电流检测放大器在单个温度 (通常为 25°C) 下的增益误差, 并应用固定改正因子将测量的增益调整为标称值, 但这种方法未考虑温度引起的漂移, 从而导致 -40°C 和 125°C 处的误差。多温度校准会收集多个温度下的增益误差测量值 (例如 -40°C、25°C 和 +125°C), 用于拟合线性模型  $y = mx + c$  和增益误差数据, 借助标称化的增益误差将测量的增益修正为标称增益, 在整个温度范围内实现接近 0 的误差。基于软件的补偿方案将预校准参数 (斜率 (m)、截距 (c)) 存储在固件中, 使用公式对测量的增益应用实时改正。

$$G_c(T) = \frac{G_m(T)}{1 + \frac{(m \cdot T + c)}{100}} \quad (2)$$

该方法将增益误差数据拟合至线性模型中:

$$G(T) = G_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad (3)$$

到

$$E(T) = m \cdot T + c \quad (4)$$

1.  $E(T)$ : 增益误差 (%)。
2.  $m$ : 斜率 (%/°C)。
3.  $c$ : 截距 (%)

该方法假设测量的增益为:

$$G_{\text{measured}}(T) = G_{\text{nominal}} \cdot (1 + E(T)/100) \quad (5)$$

校准会将增益改正为标称值:

$$G_{\text{corrected}}(T) = G_{\text{measured}}(T) / (1 + E(T)/100) \quad (6)$$

改正后的增益误差为:

$$E_{\text{corrected}}(T) = \frac{G_{\text{corrected}}(T) - G_{\text{nominal}}}{G_{\text{nominal}}} \cdot 100 \quad (7)$$

图 3-3 显示了使用上述方法在 24V 和 48V 电源下获得的 DRV8376 的校准后增益误差。

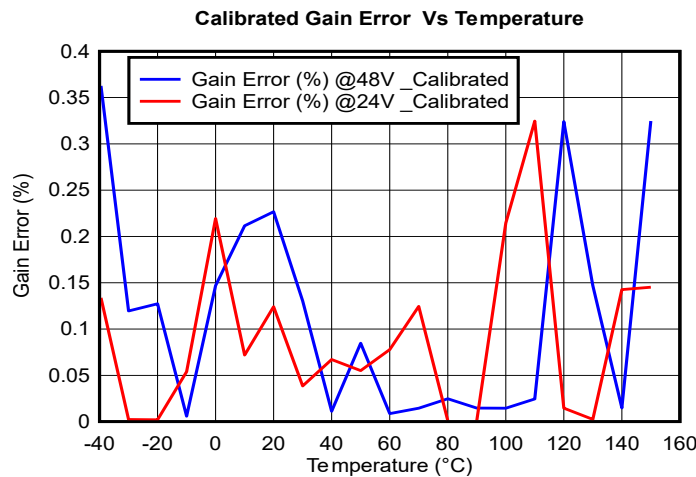


图 3-3. 校准后增益误差

## 4 总结

DRV8376 集成式低侧电流检测放大器为 BLDC 电机应用中的精确电流监控提供了一种设计，从而实现强大的过流保护、扭矩控制和换向。通过室温、多温度、自校准和基于软件的补偿等校准方法解决增益误差和温度漂移等挑战，工程师可以在宽温度范围内实现高测量精度。基于 senseFET 的架构与自适应偏移电压校准和可编程增益相结合，提高了性能，同时降低了 BOM 成本并缩小 PCB 空间。实施专为在汽车和工业系统等严苛环境中运行而设计的建议固件和 PCB 布局策略。本应用手册为工程师提供了实用工具，以更大限度地发挥 DRV8376 在精密电机控制应用中的潜力。

## 5 参考资料

- 德州仪器 (TI), [DRV8376 三相集成式 FET 电机驱动器](#), 数据表。

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月